

**This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

**Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.**

**Defects in the images may include (but are not limited to):**

- **BLACK BORDERS**
- **TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- **FADED TEXT**
- **ILLEGIBLE TEXT**
- **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- **COLORED PHOTOS**
- **BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS**
- **GRAY SCALE DOCUMENTS**

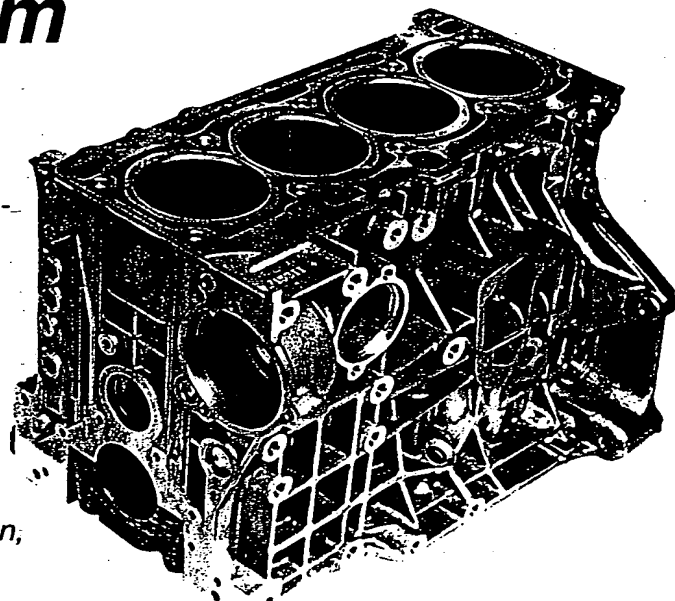
**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

# Das Aluminium-Kurbelgehäuse der Audi-Vierzylindermotoren mit 1,6 und 1,8 l Hubraum

Von **Randolf Arndt, Kurt Kusebauch, Raimund Rösch und Michael Stenzel**

Mit dem neuen A3 führte Audi erstmals einen Vierzylinder-Vollaluminiummotor in die Serie ein. Das hierfür neu entwickelte Zylinderkurbelgehäuse in Druckgußausführung wird im 1,6-l-Zweiventilmotor des Audi A3 und A4 eingesetzt und ist auch als 1,8-l-Variante mit Fünfventiltechnik zur Serienreife entwickelt worden. Außerdem findet der Aluminium-Block auch in Längseinbau- und Quereinbau-Plattformmotoren des VW-Konzerns Verwendung. In diesem Beitrag werden die untersuchten Gießverfahren, die daraus resultierte Entscheidung, die verwendeten Berechnungsmethoden, die Akustikauslegung sowie die gewählte Konstruktion beschrieben.



## 1 Einleitung

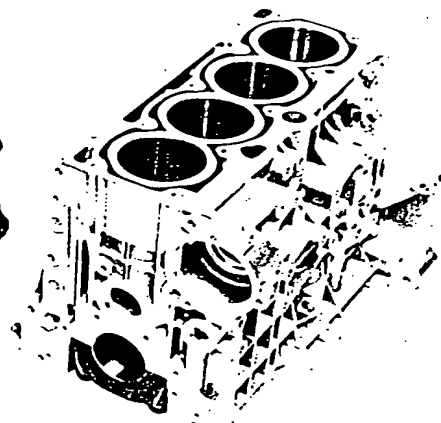
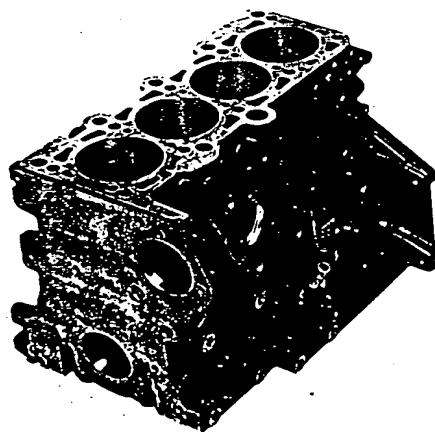
Kurbelgehäuse aus Aluminium sind in der Luftfahrt seit den dreißiger Jahren bekannt. Im Automobilbereich wurden Aluminium-Kurbelgehäuse zuerst im Rennsport in der Formel 1 eingesetzt. Die großen weltweiten Erfolge im Rallyesport, in Rundstreckenrennen in den USA sowie in der DTM feierte Audi ebenfalls mit Motoren, die mit Aluminium-Blöcken bestückt waren. Im Pkw-Bereich waren Aluminium-Kurbelgehäuse zuerst nur großvolumigen Motoren für Sportwagen und Automobilen des oberen Marktsegments vorbehalten.

Durch Forderungen nach Verbrauchsreduzierung und dem damit verbundenen Leichtbau wird nun zunehmend das mit Umstellung auf Aluminium verbundene Gewichtsreduzierungspotential auch bei Automobilen der Mittel- und Kleinwagenklasse genutzt. Wie vor Jahrzehnten der Leichtmetall-Zylinderkopf im Motorenbau den aus Grauguß vollständig substituiert hat, wird auch das Aluminium-Kurbelgehäuse in den nächsten Jahren den Grauguß-Block weitestgehend ersetzen.

Bei Audi wurden für den A3 und den neuen A6 die Vierzylindermotoren der Baureihe 827 gründlich überarbeitet, um den Anforderungen der Zukunft gerecht zu werden. Dabei wurde das Kurbelgehäuse aus Grauguß unter Beibehaltung der

Hauptabmessungen wie Zylinderabstand, Blockhöhe, Bohrung und Hauptlagerdurchmesser neu konstruiert und in einer GG- sowie einer Aluminiumvariante zur Serienreife gebracht. Eine schwierige Aufgabe für eine Aluminium-Konstruktion bei einer in Bezug auf Kompaktheit

kaum zu übertreffenden Ausgangsbasis. Bedingung war außerdem, daß die vorhandenen Zylinderköpfe in Zwei- und Fünfventiltechnik ohne Änderung zu übernehmen waren. Die Hubraumvarianten 1,6 l und 1,8 l werden mit dem gleichen Bauteil abgedeckt, Bild 1.



**Bild 1:** Vergleich zwischen GG- und Aluminiumausführung des neuen 1,6-l und 1,8-l-Kurbelgehäuses

*Fig 1: Comparison between gray cast iron and an aluminium version of the new 1.6 l/1.8 l crankcase*

Die Anforderungen an ein derartiges Kurbelgehäuse sind:

- geringes Gewicht
- Wirtschaftlichkeit bezüglich Herstellkosten und Investitionen
- minimaler Zylinderverzug
- geringer Ölverbrauch
- Herstellprozeß mit hoher Verfahrenssicherheit
- kompakte Abmaße
- optimale Festigkeit des Bauteils durch hohe mechanische Eigenschaften des Gefüges.

Ein weiteres Hauptkriterium bei einem Aluminium-Kurbelgehäuse ist die Gestaltung der Zylinderlauffläche. Das auszuwählende Gießverfahren kann allein schon durch die Linerentscheidung vorbestimmt sein. Der Laufpartner kann zum Beispiel bestehen aus:

- GG-Laufbüchsen (eingegossen oder trocken eingesetzt)
- Beschichtungen wie Nikasil, Plasma oder andere aufgetragene Laufsichten
- übereutektisches Grundmaterial
- Metall-Matrix-Verbundwerkstoffe.

## 2 Untersuchte Gießverfahren und Bewertung

Zur Entscheidungsfindung wurden bei Audi sieben unterschiedliche Gießverfahren untersucht, erprobt und verglichen. Nach Bewertung der Vor- und Nachteile der einzelnen Herstellprozesse wurde schließlich das für den gewählten Einsatzfall bestmögliche Gießverfahren ausgewählt und dann das Kurbelgehäuse zur Serienreife gebracht.

### 2.1 Halbkokille

Begonnen wurde die Entwicklung mit Kurbelgehäusen, die in einer Halbkokille gegossen worden waren. Hier wurde der untere Bereich einschließlich Kurbelraum in eine Stahlform gegossen, auf die der Zylinderlaufbahn-Bereich in einer Sandform aufgesetzt wurde. An den kritischen Stellen des Lagerstuhlbereichs konnte dadurch gezielt abgekühlt werden. Die Erstarrungsfront beginnt an den gekühlten Partien und setzt sich fortlaufend gerichtet zu den oben aufgesetzten Speisern fort. Die Konstruktion war als Closed-Deck ausgeführt und ließ die Auswahl für die Linerentscheidung offen. Eine Wärmebehandlung des Bauteils ist möglich.

### 2.2 Niederdruckguß

Das flüssige Metall wird von unten in eine Stahlform eingegossen. Beim Eingießen beträgt der Überdruck etwa 1 bar. Die Erstarrung erfolgt von oben nach unten. Die Verwendung von Sandkernen, sowie eine Ausführung in Closed-Deck-Bauweise ist möglich. Um hohe mechanische Eigenschaften zu erreichen, ist das Steuern der

Erstarrung durch Regelung der Druckbeaufschlagung möglich. Die Verweildauer des Gußstückes in der Form ist sehr hoch, da die Füllquerschnitte während der Erstarrungszeit offen bleiben müssen, um den Schwindungsverlust in der Form durch Nachdrücken von flüssigem Metall auszugleichen. Der Niederdruck-Guß ist für den Einsatz aller Buchsentechniken geeignet. Die Gußausbringung ist extrem hoch, da keine Speiser aufgesetzt werden müssen. Eine Wärmebehandlung ist möglich. Mit diesem Verfahren abgegossene Blöcke konnten selbst die hohen Anforderungen von Turbomotoren erfüllen. Der große Investaufwand, bedingt durch die langen Taktzeiten, macht jedoch den Niederdruck-Guß für Großserien wenig wettbewerbsfähig.

### 2.3 Schwerkraftkokille

Auch hier werden durch die Kühlung der Stahlaußenform und durch gekühlte Stahlstempel beste Gefügeeigenschaften erreicht. Die Erstarrung beginnt unten und setzt sich zu den oben aufgesetzten Speisern fort. Es muß wesentlich mehr Material erschmolzen werden als beim Niederdruck-Guß. Die Taktzeit ist jedoch kürzer. Das Verfahren erzeugt Closed-Deck-Kurbelgehäuse und ist für alle Linervarianten verwendbar. Eine Wärmebehandlung ist möglich. Eine zusätzliche Verbesserung der Gefügequalität erfolgt durch Druckbeaufschlagung der Speiser während der Erstarrungszeit.

### 2.4 Vollsandguß

Die Außenform und alle Kerne sind hier ausschließlich aus Sand hergestellt. Die hier notwendige höhere Erstarrungszeit kann in die Umlaufstrecke verlegt werden. Damit sind sehr kurze Taktzeiten erreichbar, die lediglich durch die Kernherstellung und die Formfüllung bestimmt werden. Wärmebehandlung ist einsetzbar. Das Verfahren ist für große und kleine Stückzahlen geeignet und ermöglicht die Verwendung aller Linervarianten sowie

die Herstellung eines Closed-Deck-Blockes.

### 2.5 Lost Foam

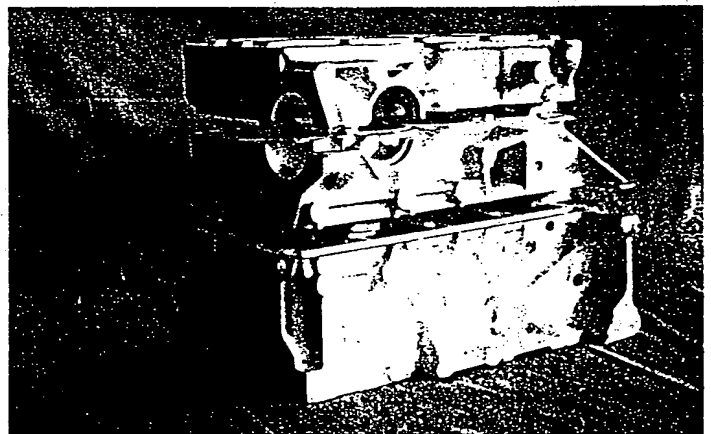
Mit Hilfe der Lost-Foam-Gießtechnik ist die Herstellung sehr komplexer Gußteile in einem Fertigungsschritt möglich. Der 827-Zylinderblock wurde dabei aus drei Schaumstoffteilen hergestellt, Bild 2. Die einzelnen Komponenten aus Styropor wurden anfangs verklebt, später verschweißt und anschließend mit einer keramischen Schlichte überzogen. Das Styroporteil entspricht dem später abgegossenen Bauteil vollkommen. Der so vorbereitete Block wird nun in Formsand durch Rütteln eingebettet. Da der eindringende Sand alle Hohlräume ausfüllt, können Ölkanäle, Ölbohrungen zur Versorgung der Hauptlager sowie alle anderen hohl gestalteten Partien bereits vorgegossen werden. Dadurch werden Investitionen an der Bearbeitungsstraße eingespart und die Fertigungszeit verkürzt. Das Aluminium, das direkt auf den Störporkörper abgegossen wird, verdampft den Schäumling und das Metall nimmt nun dessen ehemalige Form an. Der Formsand ist fast zu 100 % rezyklierbar. Es tritt nahezu kein Verschleiß an der Form der Schaumstoffkörper auf. Closed-Deck-Ausführung und Wärmebehandlung sind möglich. Die vorgegossenen Ölkanäle und Ölrückläufe müssen nicht geradlinig verlaufen. Nachteil des Verfahrens ist, daß das Eingießen von Grauguß-Buchsen bisher nicht möglich ist.

### 2.6 System Rotocast

Es handelt sich hierbei um einen Kokillenguß mit spezieller Fülltechnik. Während der Formfüllung erfolgt eine Drehbewegung des Systems Füllwanne-Kokille um 180°, wobei die Winkelgeschwindigkeit der Drehung den Füllvorgang bestimmt. Durch diese Fülltechnik wird eine ideale Temperaturschichtung vom Kokillenbodenteil zum Speiser hin erzielt. Im Vergleich zum herkömmlichen

Bild 2: Lost Foam aus drei Einzelteilen

Fig. 2: Lost Foam existing of 3 foam component parts



Schwerkraft-Kokillenguß kann die Ausbringung um etwa 70 % gesteigert werden. Durch Druckbeaufschlagung des Speisers während des Erstarrungsvorgangs ist eine zusätzliche Verbesserung des Gefüges möglich, Wärmebehandlung und Closed-Deck sind ebenfalls möglich, die Linerauswahl ist offen.

## 2.7 Druckguß

Beim Druckgußverfahren bestehen die geteilte Außenform und der den Wassermantelkern bildende Profilstempel aus Stahl. Die Erstarrung der Schmelze wird hierbei eindeutig in kürzester Zeit erreicht. Unmittelbar danach kann das Gußstück aus der Form entnommen werden. Bei der Gestaltung der Geometrie des Gehäuses ist darauf zu achten, daß der Metallfluß beim Eingießen an Strömungsumlenkungen nicht abreißt. Dies führt sonst zu Lufteinschlüssen, die dann primär nicht an der Oberfläche liegen und erst durch die Bearbeitung offengelegt werden.

Deshalb mußten bei der Konstruktion die Wanddicken möglichst ausgeglichen gestaltet werden und die Übergänge von massiven Partien zu normalen Wandstärken sanft verlaufen. Das Druckgußverfahren ist bei einer entsprechend ausgelegten Konstruktion wohl die wirtschaftlichste Lösung. Das Verfahren erlaubt das Eingießen von Grauguß-Büchsen bei den vorgegebenen geringen Zylinderabständen des 827-Motors. Eine kostengünstige Großserienfertigung kann jedoch nur als Open-Deck-Konstruktion ausgeführt werden. Durch diese fertigungsbedingte Bauweise sind der Belastbarkeit des Gehäuses Grenzen gesetzt. Eine Wärmebehandlung ist nicht möglich, es kann nur ein Warmauslagern realisiert werden. Die Auswahl der Lauffläche wird durch die Qualität des Gusses bestimmt.

## 3 Verfahrensentscheidung und konstruktive Beschreibung

Die Erprobung der unterschiedlichen Kurbelgehäuse zeigte, daß jedes Verfahren seine Vorteile, aber auch seine Grenzen hat, und daß es kein universelles Verfahren gibt, das allen gesetzten Erwartungen gerecht wird. Die Entscheidung fiel schließlich zugunsten des Druckgußverfahrens, das sich als kostengünstige Variante erwies und trotz Open-Deck-Bauweise den gesteckten Anforderungen eines Saugmotors mit 1,6 l und 1,8 l Hubraum in Zwei- und Fünfventiltechnik gerecht wurde. Begünstigend kam hinzu, daß die als Liner gewählte Grauguß-Büchse mit den vorgegebenen geringen Stegmaßen sich im Druckguß am besten

umgießen ließ. Außerdem können bereits verfügbare Druckgußkapazitäten im Konzern genutzt werden.

Der Zylinderabstand des Motorblockes beträgt wie bei der GG-Variante 88 mm. Beim gewählten Bohrungsdurchmesser bleibt damit eine Stegbreite von 7 mm zwischen den Zylindern. Durch Einsatz einer dünnwandigen Grauguß-Buchse ist das Potential für eine weitere Vergrößerung des Durchmessers gegeben. Die Buchse ist nicht bis ganz nach oben hochgezogen und ermöglicht damit ein Deck in Vollaluminium. Eine Lösung, die bearbeitungstechnische Vorteile hat und sich auch positiv beim Einsatz von mehrlagigen Zylinderkopfdichtungen aus Stahl auswirkt. Das Wasserpumpengehäuse ist stirnseitig im Block integriert. Der durch die vorhandenen Zylinderköpfe vorgegebene Abstand der Zylinderkopfschrauben führte zwangsläufig zu einem schmalen und druckgußbedingten kurzen Wassermantel, was sich aber thermodynamisch als Vorteil erwies. Die Wassermantel-Unterkante verläuft annähernd sinusförmig mit Freistellung der Schraubenpfeifen im Bereich der tieferliegenden Unterkante und mit dazwischen guter Anbindung der Büchse. Aufgrund der in der Höhe variierten Anbindung der Außenwand entsteht keine ringförmige Einschnürung der Büchsen, was sich auch bezüglich des Verformungsverhaltens positiv auswirkt. Die Blockhöhe beträgt wie bei der GG-Variante 220 mm von der Mitte der Kurbelwellen-Lagergasse aus. Die Seitenschürzen sind um 58 mm nach unten gezogen. Als Lagerdeckel-Werkstoff wird je nach Belastungsfall Grauguß oder Sphäroguß eingesetzt. Die Abstände der Hauptlager-schrauben und der Zylinderkopfschrauben sind identisch. Somit wird ein geradliniger Kraftfluß durch das Gehäuse ermöglicht und die Verformungen der Zylinderbohrung verringert. Auf der Wasserpumpenseite befinden sich die beiden Längskanäle für gefiltertes und ungefiltertes Öl. Sie liegen auf der Höhe der Unterkante der Zylinderbohrung und wer-

den vorgelassen. Um die durch die Konstruktion gewählten hohen Anforderungen für eine Druckgußkonzeption erfüllen zu können, wurden bereits im Frühstadium der Entwicklung die Hilfsmittel Berechnung zur Strukturoptimierung sowie die Erstarrungs-Simulationsrechnung eingesetzt. Dadurch konnten viele sonst notwendige Entwicklungsschleifen eingespart und eine extrem kurze Entwicklungszeit erreicht werden, Bild 3.

## 4 Die Formfüll- und Erstarrungssimulation des Gießprozesses

Die Produkt- und die Produktionsentwicklung erfordert heute die Umsetzung neuer Konzepte bei der Zusammenarbeit zwischen Entwicklung und Produktion. Simultaneous-Engineering stellt die Forderung nach schnellstmöglicher Verfügbarkeit von Informationen über Bauteileigenschaften und Qualitätsmerkmale. Für die Entwicklung komplexer Gußbauteile ist daher die Integration der Gießsimulation in den Entwicklungsprozeß dringend erforderlich. Durch rechnerisches Modellieren des Prozeßablaufes über die Simulation der Formfüllung und Erstarrung können die in Frage kommenden Gießverfahren sicher ausgewählt und die Grenzen für eine qualitätsgerechte und wirtschaftliche Fertigung festgelegt werden. Bei der Zusammenarbeit im Team zwischen Bauteilentwickler, Gießer und Werkzeugkonstrukteur wird das Prozeßverständnis gefördert.

Die unter dem Aspekt der Großserienproduktion sinnvolle Entwicklung des Zylinderkurbelgehäuses im Druckguß in der Aluminiumlegierung AlSi9Cu3 stellt eine gießtechnische Herausforderung dar. Konstruktiv bedingt befinden sich große Materialanhäufungen im Bereich der Lagerstühle, die nur schwer an den Anguß anzubinden sind. Im Lauf der Entwicklung wurde deshalb frühzeitig beschlossen, die

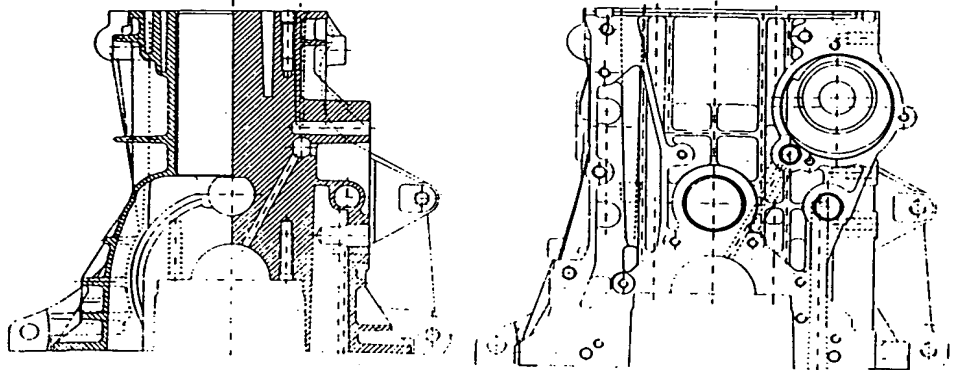


Bild 3: Schnitt und Vorderansicht des Druckgußblockes

Fig. 3: Sectional and front view of the die-cast block

Lagerstühle zu squeeze. Damit kann im Druckguß eine optimale Nachspeisung erreicht werden. Sobald der Übergang vom Zylinderkurbelgehäuse zum Anguß erstarrt ist, und im zu squeezeenden Bereich noch keine Randerstarrung vorliegt, wird dort unter extrem hohem Druck flüssiges Aluminium eingepreßt. Um diesen Prozeß abzusichern und auch andere kritische Bereiche zu erkennen, wurde eine Simulation des gesamten Gießprozesses durchgeführt.

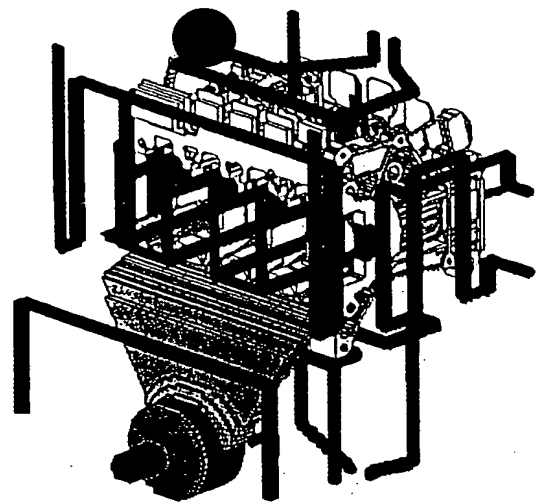
Ausgehend von den Geometriedaten des gesamten Zylinderkurbelgehäuses wurde das Gußteil einschließlich der Druckgußform mit Kühlkanälen aufgebaut, Bild 4. Für die Simulation wurde das Modell in Finite Differenzen zerlegt. Bei der Vernetzung ergaben sich für das Simulationsmodell 7,2 Millionen Volumenelemente, wobei etwa 550 000 mit Schmelze zu füllen waren. Unter Einbeziehung der thermophysikalischen Daten von Legierung und Formwerkstoff, den Wärmeübergangskoeffizienten und den prozeßspezifischen Parametern wird der Prozeßablauf während der Formfüllung und Erstarrung simuliert. Bild 5 zeigt die Formfüllung in der Schlußphase. Die farbigen Bereiche geben die Temperaturverteilung der einströmenden Schmelze in den Formhohlraum wieder. Ausgehend von der Temperaturverteilung nach beendeter Formfüllung wird die Erstarrung des Zylinderkurbelgehäuses berechnet. Ein Schnitt durch Lagerstuhl 3, Bild 6, zeigt die Problempunkte im Erstarrungsablauf. Der dickwandige Lagerstuhl erstarrt langsamer als die umliegenden Partien des Kurbelgehäuses. Daher kann dieser kritische Bauteilbereich nicht durch den Anguß gespeist werden. Infolgedessen wäre dort mit Lunkern zu rechnen. Durch das lokale Squeezeen aller Lagerstühle gelang es, diesen Bereich während der Erstarrung zu speisen und Gußfehler zu vermeiden. Ausgehend von den Simulationsergebnissen wurde auch zielsicher das Prozeßfenster für das Einfahren der Squeezezstempel definiert.

## 5 Strukturoptimierung durch FE-Methode

Mit der FE-Methode können Temperaturen, Spannungen, Dehnungen und Verformungen am Motorblock berechnet und so kritische Bereiche in einer sehr frühen Entwicklungsphase erkannt werden. Um die Belastung des Kurbelgehäuses ermitteln zu können, wurden auch der Zylinderkopf, die Zylinderkopfdichtung und die Zylinderkopfschrauben sowie die eingegossenen Grauguß-Buchsen in das FE-Modell mit einbezogen, Bild 7. In der Simulation wurden zunächst das Temperaturfeld und der Eigenspannungszustand aus dem Gießprozeß und der Fertigbearbeitung der Zylinderlaufbuchsen ermittelt. Bei der Betriebslastberechnung wur-

Bild 4: Aufbau des Gießsystems aus Gußteil und Kühlkanälen

Fig. 4: Construction of the casting system consisting of the casting and cooling ducts



Gußteil  
 ■ Einlaß  
 ■ Preßrest  
 ■ Anguß  
 ■ Kühlung  
 ■ Kühlung

Bild 5: Temperaturverteilung während der Formfüllung, die Form ist zu 94% gefüllt

Fig. 5: Temperature distribution during the mold filling, mold 94% filled

1700  
 1600  
 1500  
 1400  
 1300  
 1200  
 1100  
 1000  
 900  
 800  
 700  
 600  
 500  
 400  
 300  
 200  
 100  
 0

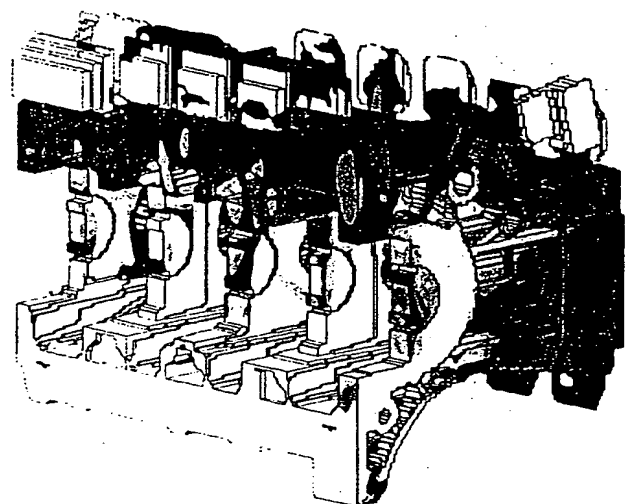
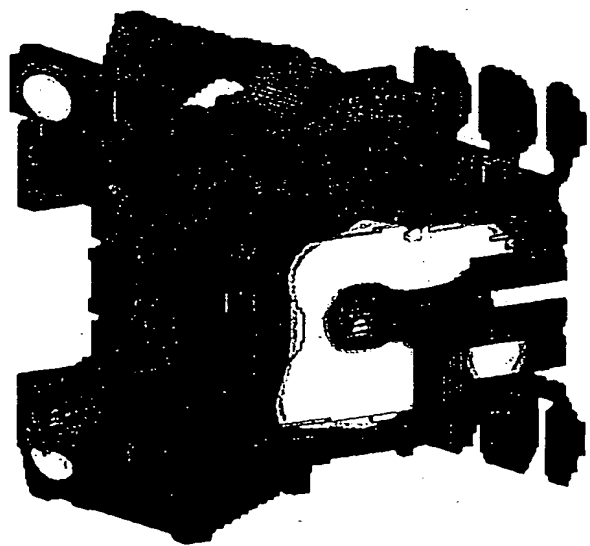
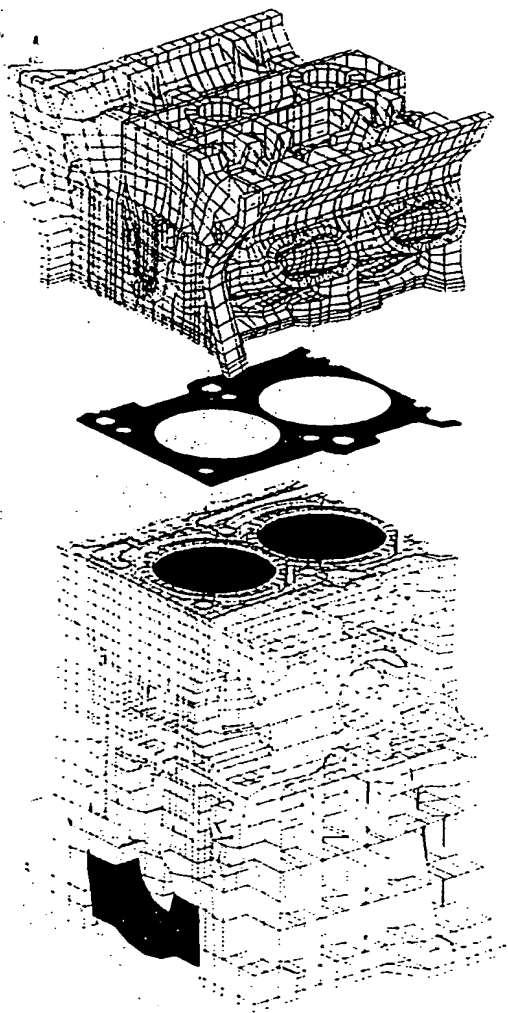


Bild 6: Darstellung der lokalen Erstarrungszeiten in einer Schnittfläche durch den Lagerstuhl 3

Fig. 6: Representation of the local solidification times in a section taken through the bearing seat 3

180  
 160  
 140  
 120  
 100  
 80  
 60  
 40  
 20  
 0





**Bild 7: FE-Rechenmodell des Zylinderkopf-Motorblockverbandes**

*Fig. 7: Computer simulation model of the cylinder head - engine block*

den dann die Lastfälle Montage der Zylinderkopfschrauben, maximale Betriebstemperatur und maximaler Zylinderdruck berücksichtigt.

## 5.1 Berücksichtigung des Herstellprozesses

Durch die vorliegende Werkstoffpaarung von Grauguß für die Zylinderlauffläche und Aluminium als Grundwerkstoff des Zylinderkurbelgehäuses ist eine detaillierte Betrachtung der thermischen Vorgänge von Bedeutung. Verformungsmessungen der Zylinderbohrung am erkalteten Gußstück des Gehäuses bestätigten, daß auch der Eigenspannungszustand aus dem Herstellprozeß berücksichtigt werden muß. Dieser teilt sich in vier Arbeitsschritte auf, die rechnerisch nachvollzogen wurden:

- Gießen
- mechanische Vorbearbeitung der Buchse
- Spannungsarmglühen
- Fertigbearbeiten der Buchse.

Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Aluminium und Grauguß wird die Buchse bei der Abkühlung durch das stärkere Kontrahieren des Aluminiums unter Druckspannungen gesetzt. Die berechneten und gemessenen Rundheitsabweichungen zeigen Ovalverformungen der Buchsen, wobei die innenliegenden Zylinder mit beidseitiger Anbindung sich stärker verformen als die äußeren Zylinder. Im jetzt folgenden ersten mechanischen Bearbeitungsschritt wird die Wandstärke der Buchse um die Hälfte reduziert. Dabei stellt sich ein neues Kräftegleichgewicht zwischen Al-Umguß und GG-Buchsen ein. Im Aluminiumguß verringern sich dadurch die Zugspannungen. Beim jetzt folgenden Spannungsarmglühen wird die Erwärmung des Kurbelgehäuses von Raumtemperatur auf 250 °C Glühtemperatur unter Verwendung von sinkenden Festigkeitsdaten bei steigender Temperatur berechnet. Analog wird das erneute Abkühlen auf Umgebungstemperatur bewertet. Im zweiten Bearbeitungsschritt erfolgt die Verringerung der Buchsenwandstärke auf Nennmaß. Die gesamte Bearbeitungsfolge wurde in einer nichtlinearen Rechnung nachvollzogen.

Der bisher ermittelte Spannungszustand repräsentiert den Eigenspannungszustand aus dem gesamten Herstellprozeß.

## 5.2 Thermische Analyse

An den Grenzflächen der FE-Struktur zu den Medien Gas, Kühlmittel, Öl und Umgebungsluft wurden die entsprechenden Temperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten aufgebracht. Mit diesen Randbedingungen wurde dann die Temperaturverteilung im Kurbelgehäuse errechnet. In einer Brennverlauf- und Ladungswechsel-Berechnung wurden der maximale Zünddruck, die mittlere Brennraumtemperatur und die wirkenden Wärmeströme berechnet. Für die Untersuchungen hinsichtlich der Motorkühlung wurde eine dreidimensionale Strömungsberechnung des Kühlmittels von Zylinderkopf und Kurbelgehäuse durchgeführt. Zum Abgleich und zur kontinuierlichen Verbesserung der Berechnungskenngrößen wurden Temperaturmessungen an befeuerten Motoren vorgenommen.

## 5.3 Strukturanalyse

Im Anschluß an die thermische Berechnung wurden mit demselben Modell statische Festigkeitsrechnungen durchgeführt. Die Belastungen durch die Montage der Zylinderkopfschrauben, die Wärmedehnungen und der Zylinderdruck wurden dabei berücksichtigt. Große Auf-

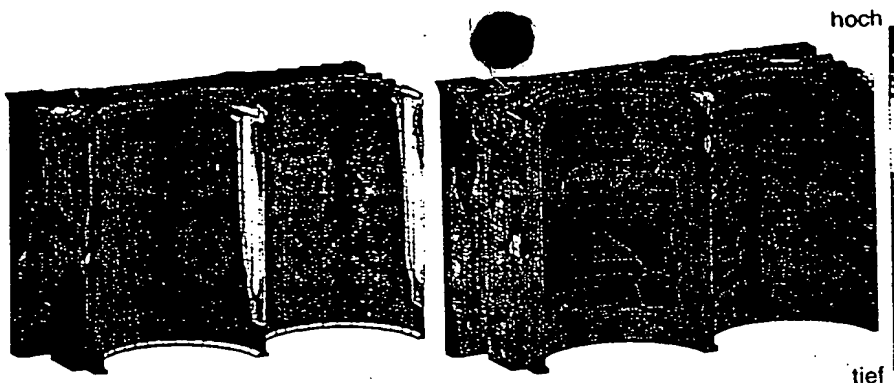
merksamkeit wurde der Zylinderkopfdichtung in ihrer Mehrlagen-Stahlausführung mit den eingearbeiteten Sicken und dem Bördel am Brennraumrand geschenkt. Während der Berechnungen am Kopf-Block-Verbund war es nicht möglich, diesen Aufbau detailliert darzustellen. Die Dichtung wurde daher als Elementschicht konstanter Dicke modelliert. Um trotzdem das Verhalten des Dichtungsmodells möglichst realistisch darzustellen, wurde den einzelnen Dichtungsbereichen ein nichtlineares Werkstoffverhalten zugeordnet. Als Grundlage dafür dienten Messungen der Steifigkeit einzelner Dichtungsbereiche bei vertikaler Druckbeanspruchung.

Die Berücksichtigung des Zünddrucks erfolgte durch Modellierung einer Druckbelastung auf die Brennraum-Oberfläche nahe dem oberen Totpunkt im jeweiligen Zylinder. Durch die Überlagerung mit den Belastungen aus der Schraubenvorspannung und der Wärmedehnung wurden dann der Betriebsspannungszustand und die Betriebsverformungen für die Lastfälle Zündung eines Zylinders im kalten und heißen Betriebszustand ermittelt. Die Berechnungen zeigten, daß die Belastungen durch die Zündung um ein Vielfaches geringer sind als die Beanspruchungen durch die Schraubenkräfte und die Wärmedehnung. Ein wichtiges Ergebnis der Strukturanalyse war die Ermittlung der Verformungen von Block, Kopf und vor allem der Zylinderlaufbuchsen. Durch Auswertung der radialen Verschiebung der Zylinderlaufflächen erhält man ein Bild der Verformung der Laufflächen für den beurteilten Betriebszustand. Durch Betrachtung einzelner Höhenschnitte einer Buchse wurden mit einer Fourieranalyse die Ordnungen und damit die Art der Verformungen ermittelt.

Die Belastungen aus dem Motorbetrieb wurden nun mit den Eigenspannungen überlagert, um dann Beurteilungen hinsichtlich Spannungen und Verformungen sowie der Haltbarkeit und Lebensdauer durchzuführen. Durch eine gezielte Veränderung der Buchsenwandstärke beim Eingießen und beim Bearbeiten können die Eigenspannungen im GG-Alu-Verbund und damit die Ovalisierung der Buchsen verringert werden. Bild 8 zeigt die Vergleichsspannungen im Bereich des Aluminiumgusses mit und ohne Berücksichtigung der Eigenspannungen. Deutlich ist die Reduktion der maximalen Spannungen im Stegbereich und generell im Umguß zu sehen.

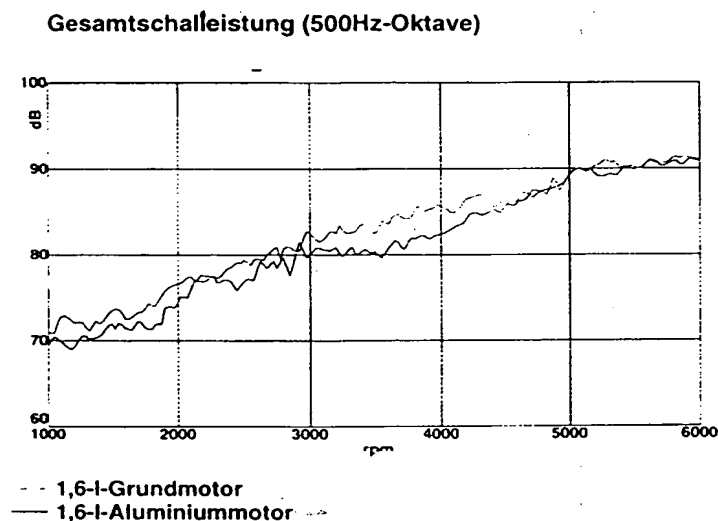
## 5.4 Lebensdauerberechnung

Mit einem Lebensdauerprogramm wurde schließlich die Sicherheit gegen Dauerbruch für die Betriebslastfälle „Mechanische Belastung - Zünden unter Vollastbedingungen“ und „Thermozyklus, Kaltstart-Vollast“ ermittelt. Dabei wurden die berechneten Spannungen, Spannungs-



**Bild 8: Vergleichsspannung für Betriebsbelastung mit (rechts) und ohne (links) Eigenspannungen**

*Fig. 8: Comparative stress for operational load with (right) and without (left) internal stresses*



gradienten, Temperaturen und vorgegebenen Oberflächenfaktoren berücksichtigt. Die Rechnung zeigte, daß die Temperaturlastwechsel vom Kaltstart in den Vollastbetrieb deutlich mehr zur Gesamtbelastung beitragen als die mechanische Beanspruchung durch den Zünddruck.

gel und des Innengeräusches im Bereich der zweiten Motorordnung oberhalb von 5500/min.

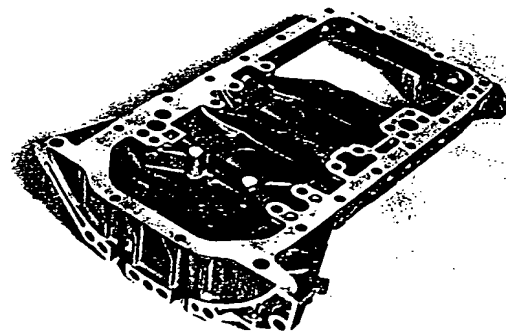
Die motorseitige Abstrahlung in der 250 und 500 Hz Oktave erfolgt vorwiegend zu den Seiten links und rechts im Bereich der Schürzen. Bei einer Umstellung von Grauguß auf Aluminium ohne zusätzliche Ver-

steifungsmaßnahmen wäre die Abstrahlung noch größer. Daher wurden beim Aluminium-Block zusätzliche Versteifungsrippen, insbesondere an den beiden Wänden, angebracht, so daß die Abstrahlung deutlich vermindert wurde. Bild 9.

Die Reduzierung des Innengeräusches in der zweiten Motorordnung, die insbesondere für die zukünftige Aluminiumvariante mit 1,8 l Hubraum und Fünfventiltechnik angestrebt wurde, war ungleich schwieriger zu erreichen, da selbst bei gleicher Gesamtaggregate-Steiifigkeit (Motor/Getriebe) aufgrund der niedrigen Trägheit des Aluminium-Motors höhere Beschleunigungen an den Motor- und Getriebestützen als beim Grauguß-Motor auftreten würden. Daher wurden mit Hilfe des FE-Berechnungsmodells des 1,8-l-Motors mit manuellem Schaltgetriebe die Steiifigkeiten im Flanschbereich des Motors zum Getriebe vergrößert. Außerdem zeigte sich, daß aufgrund des größeren Hubes (1,8-l-Motor: 86,4 mm, 1,6-l-Motor: 77,4 mm) beim 1,8-l-Motor weitergehende Maßnahmen erforderlich waren, um den hochwertigen Ansprüchen zu genügen. Daher wurde mit Hilfe der FE-Bere-

**Bild 9: Abstrahlung 1,6-l-Aluminiummotor/Graugußmotor in der 500-Hz-Oktave**

*Fig. 9: Acoustic radiation of the 1.6 l aluminium engine/grey cast iron engine in the 500 Hz octave*



**Bild 10: Leiterraahmen zur Verbesserung der Aggregatsteiifigkeit**

*Fig. 10: Frame support to improve the powerplant stiffness*

## 6 Akustik

Das Hauptziel der Akustikentwicklung für den Motorblock aus Aluminium bestand darin, den Leichtbau (der Block aus Aluminium ist 14,5 kg leichter als der Grauguß-Block) mit einer verbesserten Akustik zu kombinieren.

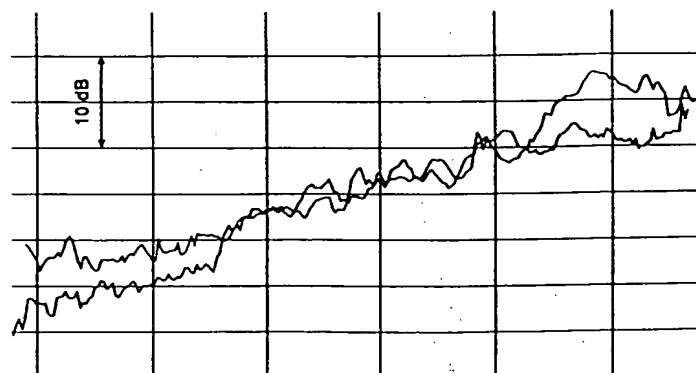
Die wichtigsten Akustikanforderungen für die Entwicklung waren:

- Verminderung der Abstrahlung im mittelfrequenten Bereich (250 Hz und 500 Hz Oktave)
- Erhöhung der Biegesteiifigkeit des Gesamtaggregate (Motor/Getriebe) zur Verringerung der Beschleunigungspe-

**Bild 11: Innen-geräuschpegel des 1,8-l-Alumotors mit und ohne Leiterraahmen**

*Fig. 11: Internal noise level of the 1.8 l aluminium engine with and without frame support*

• ohne Leiterraahmen  
— mit Leiterraahmen



rechnung ein Leiterraum entwickelt, der insbesondere durch die zusätzliche Steifigkeit unterhalb des Motorblocks die Anbindung Motor/Getriebe verbessert und somit Aggregatesteifigkeit vergrößert, Bild 10. Der Innengeräuschpegel in der zweiten Motorordnung wird dadurch oberhalb von 5500/min um 3 bis 5 dB gesenkt, Bild 11.

## Literaturhinweis

- [1] Marzy, R.; Stenzel, M.; Uhl, W.: Struktur-optimierung des Zylinderkopf-Motorblock-Verbandes mit der FE-Methode. 18. Internationales Wiener Motorensymposium, April 1997



You can read the English version of this article in **MTZ worldwide**.

Subscription Hotline:  
+49 / 6 11 / 78 78 151

## 7 Zusammenfassung

Durch den Einsatz modernster Simulationsmethoden konnten viele sonst notwendige Entwicklungsschritte eingespart werden. Die Entwicklungszeit für die Druckgußvariante betrug vom ersten Prüfstandslauf bis zum Serieneinsatz lediglich 18 Monate. Eine Rekordzeit auch für Planung und Produktion, die in diesem Zeitrahmen die Serienherstellung des Gehäuses auf neu errichteten Anlagen ermöglichen. Das neue Aluminium-Kurbelgehäuse von Audi kann somit als Musterbeispiel moderner Simultaneous-Engineering-Arbeit bezeichnet werden.

## Die Verfasser

Randolf Arndt ist Referent in der Abteilung Akustik der Audi AG und dort für die Koordination Motorakustik zuständig.



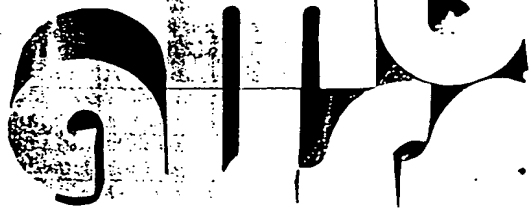
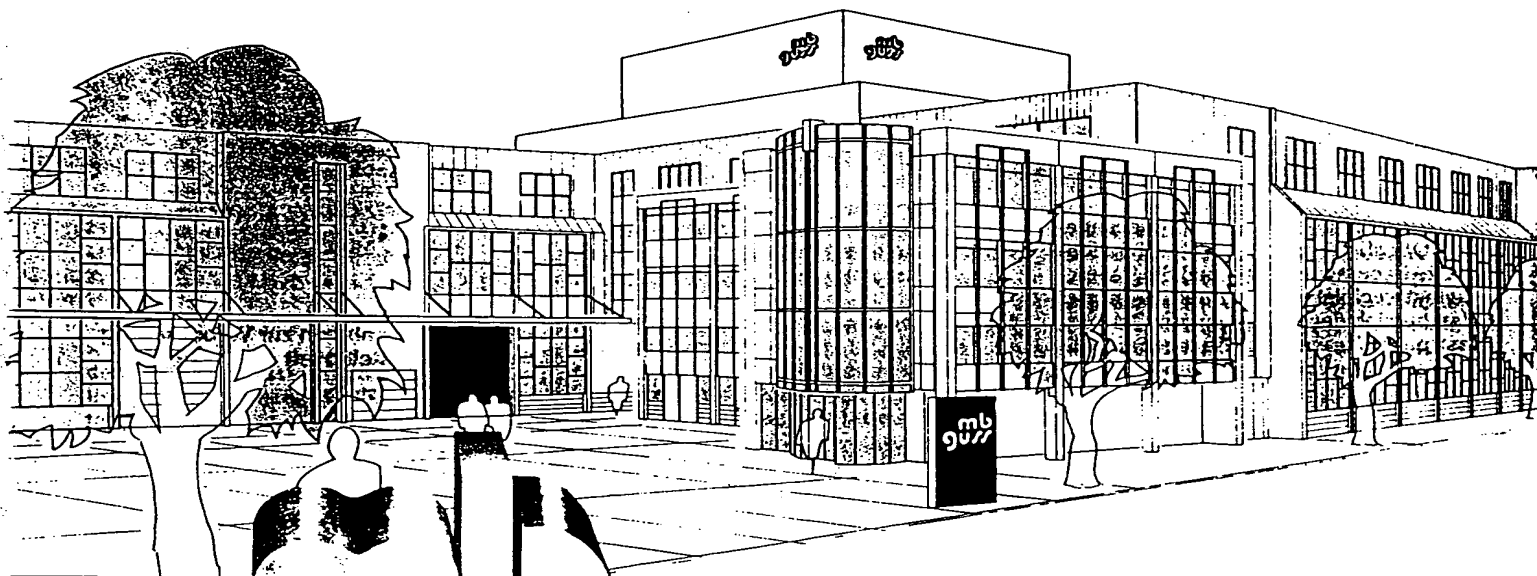
Kurt Kusebauch ist in der Motorkonstruktion der Audi AG zuständig für Triebwerk Ottomotor und Projektleiter für den 1,6-l-Aluminiummotor.



Dr.-Ing. Raimund Roesch ist Referent in der Abteilung Werkstoffe / Verfahren / Produktrecycling der Audi AG.



Michael Stenzel ist Mitarbeiter in der Abteilung Aggregateberechnung der Audi AG.



„Leichtmetall in Bewegung“\*\*\*\*\*

gekonnt entwickeln  
perfekt gießen  
präzise bearbeiten  
komplett montieren

METALLBEARBEITUNG FRIEDRICHSHAFEN GMBH, D-88045 Friedrichshafen, Tel. 0 75 41-7002-0, Fax 7002-7